科学发明情境中问题提出的脑机制再探

童丹丹[1,2] 李文福[3] 禄鹏[1] 杨文静[2] 杨东[2] 张庆林[2] 邱江[2]

(1.西北师范大学心理学院,甘肃省行为与心理重点实验室，甘肃兰州 730030; 2.西南大学心理学部,认知与人格教育部重点实验室,重庆北碚 400715; 3. 济宁医学院精神卫生学院,山东济宁 272067)

摘要　以高生态学效度的科学发明问题情境作为实验材料，采用静息态功能磁共振成像技术，基于低频振幅(ALFF)和静息态功能连接(RSFC)的分析方法，探讨创造性科学问题提出的脑机制。结果发现，在控制了被试性别、年龄后，提出新颖有效性问题的比率越高，左内侧前额叶(Left media prefrontal cortex, L-mPFC)和右小脑前叶(Right cerebellum)的 ALFF 值越高。进一步功能连接分析发现，提出新颖有效性问题的比率与 mPFC 和楔叶(Cuneus)之间的功能连接强度呈显著正相关。结果强调 mPFC 对于科学发明情境中问题提出的重要作用,且更高比率的新颖有效性问题的提出是通过 mPFC 与其它脑区的协同联结来实现的。

关键词　创造性；科学发明问题提出；内侧前额叶；低频振幅；功能连接

1 引言

创造性思维是指个体在已有知识经验的基础上，利用多角度思维活动进而产生具有新颖独特特点和使用价值的产品的过程，是人类文明的基石和社会进步的动力(Hennessey & Amabile, 2010; Jung, Mead, Carrasco, & Flores, 2013; Sternberg & Lubart, 1993)。提出问题是创新的开始，所以越来越多的研究者认为善于提出问题是创造性思维的重要和关键组成部分(Abdulla & Cramond, 2018; Abdulla, Paek, Cramond, & Runco, 2020; Hu, Shi, Han, Wang, & Adey, 2010)。问题提出是问题解决的先导，它将决定个体如何处理问题，以及个体能否顺利解决问题等过程(Gilhooly, Fioratou, & Henretty, 2011; Holman, 2018)。Getzels 也强调问题以能够产生解决方法的方式被发现和提出的重要性，并认为创造性成就的获得源于创造性的问题提出而不是问题解决(Getzels, 2011)。已有研究者从行为和神经科学角度对问题解决的认知

收稿日期：2019-12-20

国家自然科学基金项目(31470981; 31771231)，教育部人文社会科学研究项目(19XJC190001)，甘肃省社科规划项目(19YB026)，山东省高等学校“青创科技计划”项目(2019RWF003)。

通讯作者：张庆林, E-mail: zhangql@swu.edu.cn；邱江，E-mail: qiuj318@swu.edu.cn

神经机制进行了大量探索(Aziz-Zadeh, Kaplan, & Iacoboni, 2009; Huang, Fan, & Luo, 2015; Jung-Beeman et al., 2004; Kounios & Beeman, 2013; Qiu et al., 2010; Subramaniam, 2008; Wu, Knoblich, & Luo, 2013; Xue, Lu, & Hao, 2018; Zhao et al., 2013; 杨文静, 靳玉乐, 邱江, 张庆林, 2018)，但问题提出的研究在一定程度上还不够充分，脑机制的研究更是受到研究者的有限关注(Abdulla & Cramond, 2018; Reiter-Palmon & Robinson, 2009; Dandan et al., 2013; 胡卫平, 韩葵葵, 2015)(Reiter-Palmon & Robinson, 2009)。

对创造性思维认知加工过程的探究是创造性研究的一个基本问题，已有研究对创造性问题提出进行了诸多探索(Dietrich & Kanso, 2010; 周丹, 施建农, 2005)。较为常见的研究方法是通过呈现不同特征的问题材料来明确问题提出的关键要素。如将呈现式问题情境和发现式问题情境 (Runco & Okuda, 1988)，熟悉领域问题情境和陌生领域问题情境(吴真真, 张庆林, 2005)，真实情境和非真实情境(Runco, Illies, & Reiterpalmon, 2005)，实物材料和言语材料(陈丽君, 张庆林, 蔡治, 2006)，结构良好问题情境和结构不良问题情境(Lee & Cho, 2007)，矛盾式问题情境和潜藏式问题情境(陈丽君, 郑雪, 2011)，开放式问题情境和封闭式问题情境(Cheng, Hu, Jia, & Runco, 2016)等进行对比研究。结果发现，问题情境是问题提出的关键因素，并与如半球互动水平、知识水平、明确性指导语效应等交互对创造性问题提出产生影响(Cheng et al., 2016; Lee & Cho, 2007; 王博韬, 段海军, 韩琴, 胡卫平, 2017)。此外，认知抑制能力(胡卫平, 程丽芳, 贾小娟, 韩蒙, 陈英和, 2015)、人格特质(李海燕, 胡卫平, 申继亮, 2010; Paletz & Peng, 2009)、情绪和动机(Chen, Hu, & Plucker, 2016; 胡卫平，周蓓，2010)、学校环境(Han, Hu, Liu, Jia, & Adey, 2013; Jia et al., 2017)等也是创造性问题提出重要的内外部影响因素。

已有研究对创造性问题提出的认知过程给予了较为详尽的描述，但仍存在一些问题。例如, 从实验材料来看, 已有实验材料多为从独特性、灵活性和流畅性的维度进行评价的发散性思维测验(Hu & Adey, 2002; Hu et al., 2010;申继亮, 胡卫平, 林崇德, 2002; Torrance, 1966)，缺少对有效性(适宜性)的探讨。此外，已有研究较多基于为数不多的简单物品、文字图片或人为设定的问题情境研究创造性问题提出过程(陈丽君, 郑雪, 2011; Runco et al., 2005; Runco & Okuda, 1988; Torrance, 1966)，较少使用真实情境的实验材料对问题提出进行测量。有效性是创造性思维最本质的特征之一，是评判创造性能力的很好指标(Sternberg & Lubart, 1993; 吴真真, 邱江, 张庆林, 2008)，且相比于标准的发散性思维测验，真实情境的问题提出测试分数更能有效预测个体的创造性能力，是创造性成果产生的有利保障(Okuda, Runco, & Berger,

1991)。基于此，探讨创造性问题提出的认知过程，尤其是揭示创造性问题提出的脑机制需要采用更贴合创造性思维本质且更有生态学效度的实验材料。

科学问题研究是人类最典型且最富有创造力的活动，创造性思维体现最为充分、最为集中的领域是科学领域(钱兆华，1999)。科学创造力是一般创造力在科学学科中的具体表现，其核心是科学创造性思维，即具有新颖性和价值性的科学思维活动(胡卫平，韩葵葵，2015)，提出问题是科学创造过程的重要阶段(Hu et al., 2010)。Ward 认为使用现实生活中发生过的科学发明创造实例对创造性思维进行研究，因其接近科学发明创造实际，有更高的生态学效度(Ward, 2007)。国内学者张庆林等(张庆林, 田燕, 邱江, 2012；朱丹, 罗俊龙, 朱海雪, 邱江, 张庆林, 2011)也基于现实生活中发生过的科学发明实例编制了测量科学创造力的科学发明创造实验问题材料。基于此，本研究认为可以将科学创造力和问题提出相结合，选用科学领域中体现创造性思维的实例开发有生态学效度的创造性问题提出的测量工具。

“表征转变”理论认为人们在面对问题情境时，倾向于根据问题情境所提示的方式来进行表征，并在相应的错误问题空间内进行搜索。如果在问题空间内长时间找不到方法，就需要在元水平空间中去搜索恰当的表征，进入正确的问题空间，最终使问题得以解决(Kaplan & Simon, 1990)。“原型激活”理论则认为当问题解决者遇到思维僵局时，可以在表面无关但具有内在语义连接的原型材料的启发下，打破原有的思维僵局，将原型事物中所包含的启发信息运用到科学问题中，从而进入正确的问题空间(张庆林 等, 2012)。因此，童丹丹(2017)基于“表征转变”和“原型启发”理论，从“新颖性”和“有效性”的角度出发，收集科学领域内新近发生的科学发明创造实例，采用测量和访谈相结合的方法，通过系列实验编制了拥有难度，定势强度、启发量等多项指标的更贴合创造性思维本质且更有生态学效度的创造性科学问题提出材料，并完成了实验材料和实验范式的有效性验证。

创造性问题解决已被证明是一项需要全脑参与的复杂认知过程，涉及不同脑区间的功能协作(Aziz-Zadeh et al., 2009; Jung-Beeman et al., 2004; Kounios & Beeman, 2013; Luo & Niki, 2003; Qiu et al., 2010; Wu et al., 2013; 范亮艳 等, 2014; 李文福, 童丹丹, 邱江, 张庆林, 2016)。在创造性问题提出领域，王博韬(2013)使用脑电分析方法(electroencephalogram, EEG)，结果发现混合利手个体的创造性科学问题提出分数更高，且在前额叶、额中区存在更多的 α 波，说明创造性科学问题的产生有赖于负责抑制控制及概念联结的额叶等关键脑区的参与。童丹丹等人(2013)采用功能性磁共振成像技术(Functional Magnetic Resonance Imaging，fMRI)，探讨科学发明情境中的问题提出的大脑机制。结果发现激活的脑区为左侧

梭状回、左侧内侧额叶、左侧豆状核、右小脑和左侧中央前回。Tong 等人(2013) 采用类似的方法探讨在有无原型两种条件的科学发明问题提出，结果发现问题提出中原型启发效应的脑激活定位在楔前叶和角回。周寰(2015)采用事件相关电位技术(Event-related potential, ERP)发现高创造性科学问题提出个体在新颖性评价任务中的P 3 成分波幅值上存在显著差异, 说明他们工作记忆的存储和概念表征更新的效率更高，注意模式更加灵活，进而能更有效地评价图片的新颖性。虽然上述研究对于理解创造性问题提出的本质具有重要作用, 但由于在实验范式和技术手段等方面存在差异且研究数量匮乏，导致获得的结果很难相互印证和支撑创造性科学问题提出的神经机制还缺乏共识，科学创造力神经机制的研究仍需要大力加强(胡卫平，韩葵葵，2015)。因此，利用更丰富的，尤其是脱离实验任务限制的脑影像技术研究创造性问题提出的神经机制显得尤为必要。

静息态功能磁共振成像技术可以记录没有外在认知任务状态下大脑的自发神经活动(Biswal, Yetkin, Haughton, & Hyde, 2010; Zuo et al., 2010), 因此，该方法不受任务的制约, 测量的是人脑在休息状态下血氧水平依赖低频波动信号，能够较好且稳定的鉴别不同心理引起的大脑自发神经活动的差异(Buckner, 2012; Fulwiler, King, & Zhang, 2012)。基于静息态功能磁共振成像技术，已有研究从个体差异角度对创造性思维的神经机制进行探讨，在一定程度上说明了创造力不同的个体具有特定的大脑基础。Takeuchi 等人(2012)使用基于种子点的静息态功能连接(Resting state functional connectivity, RSFC)分析方法, 结果发现个体在发散性思维任务上的成绩与内侧前额叶和后扣带回之间的 RSFC 强度呈显著正相关。Wei 等人(2014)发现托兰斯发散性思维测验的分数与内侧前额叶和颞中回之间的功能连接强度显著正相关。Chen 等人(2014)的研究结果进一步发现，个体在创造性成就测验上的分数与双侧前扣带和额中回的 RSFC 强度呈负相关，且个体的认知灵活性对其关系存在中介效应。李文福等人(2016)综合采用局部一致性(Regional homogeneity, ReHo)和低频振幅(amplitude of low frequency fluctuation, ALFF)分析方法，结果发现个体科学发明问题解决的正确率与左侧前扣带的 ReHo 和 ALFF 值呈显著正相关。已有研究或采用基于种子点的静息态功能连接方法探索关于创造性思维的长距离功能连接，或关注脑区内自发 BOLD(Blood oxygenation level dependent)信号的局部活动特性，缺乏从静息态脑成像角度对于创造性思维脑机制的完整探索。此外，已有研究主要使用发散性思维任务、创造性成就问卷和科学发明问题解决实验材料探索创造性思维的脑机制，尚未从创造性问题提出的角度进行探讨。

ALFF 是采用 0.01～0.08Hz 频段内所有频率点上波幅值的平均值来表示每个体素的

BOLD 信号强度, 从能量的角度反映了各个体素在静息状态下自发活动水平的高低(Zang et al., 2007)。它不仅能够反应个体不同的状态，还能反映出个体的人格差异，是使用较为广泛的测量局部神经自发活动的有效指标(Wei, Duan, Zheng, Wang, & Chen, 2013)。已有研究表明ALFF 和多种认知能力，个性品质或精神病理学疾病有关, 比如工作记忆(Zou et al., 2013)，幸福感(罗扬眉, 李宝林, 刘杰, 毕重增, 黄希庭, 2015)，阿尔兹海默症(He, Wang, Zang, Tian, & Jiang, 2007)等。RSFC 反应的是不同脑区之间的自发神经信号的连通性和这些脑区形成网络的协同作用，可通过连通性、整合性良好的脑网络揭示外在行为表现的内在神经环路，是研究大脑神经网络自发性活动的有效指标(Mennes et al., 2010)。该方法已经被广泛用于个体认知能力研究, 比如创造力(Takeuchi et al., 2012)等；也可以反映各种精神病理学疾病与脑区之间的联系, 比如社会焦虑症(Hahn et al., 2011)和抑郁症(Zeng et al., 2012)等。同时使用 ALFF (静息态自发信号)和 RSFC (不同脑区信号的协同)，可以有效且完整的探明创造性问题提出的大脑内部稳定的功能组织。

已有研究表明，高创造性问题提出和低创造性问题提出个体在新颖观点产生、无关信息抑制等能力存在系统性差异(Dandan et al., 2013; 胡卫平 等, 2015; 王博韬, 2013; 周寰, 2015)。内侧额叶被认为是新颖观点产生和评估的经典脑区，且作为“意识努力”的关键点主要负责认知控制等思维过程(Beaty et al., 2014; Chen et al., 2014; Fink et al., 2010; Kounios et al., 2006; 罗劲, 张秀玲, 2006; Shamay-Tsoory et al., 2011; Talati & Hirsch, 2005)。据此，我们假设内侧前额叶的 ALFF 值可能会与创造性科学问题提出有关。此外，已有研究发现，内侧前额叶作为默认网络的核心节点，其与默认网络其他节点功能连接强度的增强在创造性观点产生中发挥重要作用(Takeuchi et al., 2012; Wei et al., 2013)。科学创造力与额叶、顶叶和扣带回有着密切的关系(Jung et al., 2010; Limb & Braun, 2008; 沈汪兵 等, 2010)。据此，我们选定内侧额叶为种子点并假设造性科学问题提出的比率与内侧前额叶和后扣带/楔前叶(Takeuchi et al., 2012),顶叶下叶(与空间表征和处理相关) (Gansler et al., 2011)等默认网络节点之间的功能连接强度呈显著正相关。

基于这些假设，本研究拟采用静息态功能磁共振成像技术中的 ALFF 和 RSFC 两种指标, 选取发生在现实生活中的具有较高生态学效度的科学发明问题为实验材料,以探明静息状态下大脑自发活动与创造性问题提出之间的关系。

2 方法

2.1 被试

通过网络广告招募 107 名健康在校大学生参与研究，删除 3 名头动数据过大的被试，最后 104 名被试(平均年龄 19.26 ± 0.99 岁)被用于正式分析。 其中男性 32 人(平均年龄 19.66 ± 1.15 岁)，女性 72 人(平均年龄 19.08 ± 0.85 岁)。为检验样本量是否合理，采用 G* Power 3.1(Faul, Erdfelder, Buchner, & Lang, 2009)软件进行 Post hoc 统计功效检验(effect size (f^2) = 0. 25, α= 0. 05)，结果显示 power = 0.99，表明样本量充足。所有参与者视力或矫正视力正常，无精神疾病史和手术外伤史，具有电脑操作技能，实验前未接触过实验材料。被试进入实验室后，首先签署知情同意书。然后由主试介绍实验程序，被试在扫描室外完成行为实验，然后由扫描员将其送入扫描室，进行静息态扫描。实验后给予适当报酬。该研究所有试验程序和处理皆通过了学术伦理委员会的批准。

2.2 实验材料

从创造性科学问题提出材料库中选取难度适宜的 9 个题目用于正式实验(童丹丹, 2017)。实验材料通过对科学发明创造实例筛选编制而来，所有材料都满足新颖、通俗易懂和不涉及专业领域知识的条件。每个材料均包含暗含矛盾的问题情境、具有一定错误导向的旧问题和具有启发性信息的原型。下面是实验材料的 1 个样例：

问题情境：地球周围有很多小行星，如果行星撞击地球会带来毁灭性的灾难。可如果发射原子弹去炸毁行星，又会带来各种原子辐射的危害。

旧问题：如何解决原子弹炸毁小行星后带来的辐射问题？

原型：我们在打台球的时候，用一点点力量撞击一颗前进中的台球，它就会改变方向，离开原来的轨道。

基于“表征转变”和“原型启发”理论，个体在遇到带有定势思维的问题情境和旧问题时(思维僵局)，倾向于根据问题情境所提示的方式来进行表征，并在相应的错误问题空间内进行搜索。如果个体想提出创造性问题就需要进入元水平问题空间，搜索到其他恰当的问题表征，这时则可能提出新颖性问题，而激活头脑中或者外界环境中的具有语义连接的启发性信息，并与问题情境建立联系，则使得提出新颖且有效的创造性问题成为可能(Holman, 2018; Kaplan & Simon, 1990; 童丹丹, 2017; 张庆林 等, 2012)。暗含矛盾的问题情境可以引发个体对提出问题的思考和猜想性的解释。旧问题的设定采用个体阅读矛盾情境后，首先会想到的且没有任何价值性的简单问题，可以为个体提供错误的思维定势，引导其进入错误的问题空间。原型的提供既可以帮助个体跳出错误的水平空间又能为个体指明了问题

方向，进入正确的问题空间。

创造性科学发明问题提出材料注重如何跳出情境和旧问题所引发的错误问题空间，进而寻找正确问题方向的能力。当前测试中旧问题的思维定势更类似于生活中的百思不得其解，弥补了以往实验材料在生态效度上的不足。本研究所使用的实验材料皆由课题组精心编制而成, 并被用于其他研究中(童丹丹, 2017)。已有研究表明，有效性问题提出的比率与创造性成就测试分数相关显著，表明创造性科学发明问题提出材料能够在一定程度上预测到现实生活中创造性成就的高低，具有一定的有效性。此外，从事不同创新性工作的个体(研发类员工和操作类员工)在科学发明问题提出分数上差异显著，协变年龄和学历等额外变量后，结果发现研发类员工提出有效性问题的比率显著高于操作类员工，实验结果进一步在企业环境中验证了实验材料的有效性(童丹丹, 2017)。

2. 3 行为数据的收集与评价

采用 E-prime 软件完成实验材料的编程与呈现。结合已有的科学发明问题的研究(吴真真等, 2008)，本研究在实验中采用“9 对 9”的“学习原型-提出问题”两阶段实验范式考察个体提出新颖有效性问题的大脑机制。具体流程为：首先在屏幕中央呈现注视点“+”，黑底白字，时间为 0.5 秒，然后随机呈现 9 个原型材料，被试仔细阅读原型材料，理解后按“1”键，按键后跳至下一个原型材料，每个原型材料至多呈现 60s，时间到自动跳到下一个，直到呈现完全部原型材料。接下来屏幕中央再次呈现注视点“+”，黑底白字，时间同样为 0.5 秒，随后随机呈现 9 个问题情境和旧问题，被试理解后基于问题情境提出新颖有效的新问题，60s 后问题情境和旧问题消失并呈现作答提示，被试在答题纸上根据题目呈现顺序依次写下想到的问题，写完按“1”键，提示消失进入下一个问题情境，直到呈现完全部问题情境和旧问题。实验流程如图 1 所示。

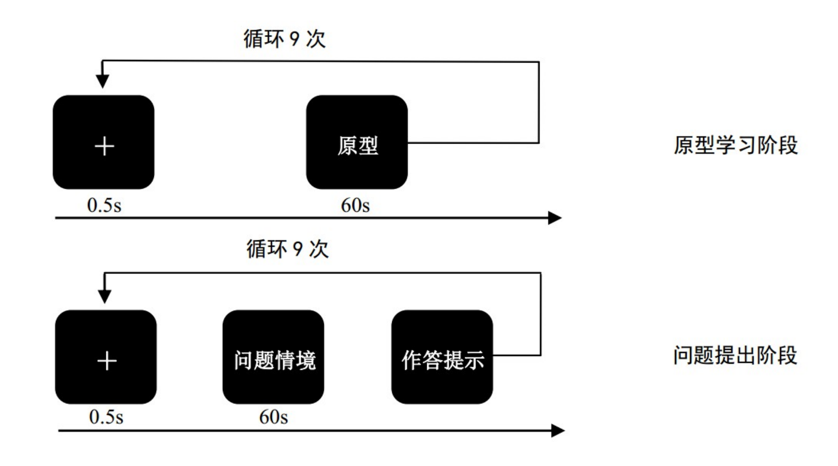


图 1 实验流程图

基于“表征转变”理论与“原型激活”理论制订了创造性科学问题提出材料的评价标准(Kaplan & Simon, 1990; 张庆林 等, 2012)。如果答案是对旧问题的简单重复或者对其意思的重复表达，则认为个体仍束缚于旧的问题空间，例如：如何减少原子辐射的影响？/怎么样制造辐射低的核武器？计 0 分；如果答案不纠结于旧问题所设定的问题空间，而是指向未来且充满想象性，具有新颖性，例如：行星撞击地球的危害大还是原子辐射危害大？/小行星为什么会撞击地球？计 1 分；如果答案既不纠结于旧的问题空间且提出的问题为带有一定的问题解决思路的科学假设，具有有效性或价值性，例如：可以设计特定的轨道，让小行星自己远离地球吗？/可以借用其他力量撞击小行星，使其偏离原来的轨道吗？计 2 分。新颖性问题的比率是指得分为非 0 分的题目占总测试题目的比率，新颖有效性问题的比率是指得分为 2 分的题目占总测试题目的比率。新颖性问题的比率越高，表明被试越能够打破旧的认知模式，跳出错误的问题空间，提出新颖性的问题；新颖有效性问题的比率越高，表明被试越能够通过思维重组或原型启发等认知过程，建立与任务目标相关的有效联结，提出有价值的问题。

2. 4 静息态数据采集与预处理

静息态磁共振影像通过西门子 3.0 Tesla 磁共振成像扫描仪(Siemens Medical, Erlangen, Germany)获得。使用块状泡沫垫和专用耳塞来减少头部移动及仪器噪音的干扰。扫描前, 让被试更换实验室专用服装, 同时取下佩戴的金属首饰等，以避免衣服上的金属物体对被试安全和成像质量的影响。扫描过程中要求被试闭上眼睛躺着放松，在整个扫描过程中保持头部不要移动, 闭眼休息(Wang et al., 2011)。

采用全脑平面梯度回波成像序列(gradient-echo echo planar imaging，EPI)进行扫描，相关扫描参数为：重复时间(repetition time, TR) = 2000ms，回波时间(echo time, TE) = 30ms，反转角(flip angle) = 90°，扫描视野(field of view, FOV) = 220mm×220mm，层厚(thickness) = 3mm，层间距(slice gap) = 1mm，体素大小(voxel size) = 3.4×3.4×4mm^3，扫描矩阵(acquisition matrix) = 64×64。扫描总时间为 8 分钟零 4 秒，共获得 242 个时间点的连续图像。

基于 Matlab 平台，使用 DPARSF (Data Processing Assistant for Resting-State fMRI software, http://www.restfmri.net/forum/DPARSF)软件对数据进行处理(Yan & Zang, 2010)。具体步骤如下：(1) 检查静息态的数据质量，查看是否有扫描不全或者存在伪影的被试数据；(2) 将原始的 DICOM 数据转换为可进行分析的 NIFTI 数据格式；(3) 为了获得稳定的磁共振图像，剔除前 10 个时间点的数据，并逐步对剩余稳定数据进行时间层校正(slice timing)、头动

校正(head motion)，删除平动大于 3mm 和转动超过 3 度的被试(删掉 3 个被试数据)并去除生理噪音；(4) 采用 DARTEL (diffeomorphic anatomical registration through exponentiated Lie algebra)将处理后数据标准化到 MNI (montreal neurological institute)标准空间模板，标准化后的体素大小是 3 mm × 3 mm × 3 mm；(5)使用 6mm 平滑核(full width at half maximum, FWHM)对图像进行高斯平滑，以增加信噪比；(6) 降低低频和高频噪音的影响，进行去线性漂移。

2.5 统计分析

ALFF 的计算和分析。采用 REST(Resting-state fMRI data toolkit)工具包 (Song et al., 2011)，依照 Zang 等人(2007)的计算方法，将全脑每一个体素的时间序列进行傅里叶变换，而后对频域功率谱的峰下面积开平方，得到的值即可代表信号震荡的幅度。同时，将每个体素在 0.01～0.08Hz 之间的频率平方根进行平均, 即为 ALFF 值。为了达到标准化的目的，将每个体素的 ALFF 值除以全脑均值作归一化处理，获得每个体素标准化的 ALFF 值(Biswal et al., 2010)。为探索创造性科学问题提出能力与低频振幅的关系，本研究使用基于体素的协方差分析方法(voxel-wise analysis of covariance，ANCOVA)进行全脑分析，年龄、性别为无关变量，创造性科学问题提出分数为感兴趣变量。使用多元线性回归(multiple linear regressions) 来检测问题提出分数与 ALFF 的关系。显著性结果经过拓扑 FDR(topological FDR)校正，显著性水平为 $p < 0.05$ (two tail) (Chumbley & Friston, 2009)。

RSFC 的计算和分析。同样采用 REST 工具包，基于种子点相关分析的方法，分别以研究中 ALFF 显著相关的脑区和创造性思维静息态分析经典文献中具有解剖学代表的内侧前额叶(mPFC, X=0,Y=54, Z=8) (Beaty et al., 2014; Whitfield-Gabrieli & Nieto-Castanon, 2012)为感兴趣区(region of interest，ROI)，并以感兴趣区坐标为圆心，建立一个半径为 6mm 的圆。计算方法如下：首先，提取每个感兴趣区域内所有体素的时间序列，同时把全脑信号、白质、脑脊液和 6 个头动参数作为无意义的变量进行回归; 其次，用 voxel-wise 相关分析法计算每个种子点与全脑其他脑区之间的相关系数,并将相关系数 r 进行费舍 z 转换(Fisher`s r-to-z transformation)。最后，使用多元线性回归分析，年龄、性别为无关变量，创造性科学问题提出分数为感兴趣变量，计算功能连接强度与创造性科学问题提出的相关，进一步检验是否存在特定的网络连接可以显著预测创造性科学问题提出能力。显著性结果同样经过拓扑 FDR 校正，显著性水平为 $p < 0.05$ (two tail) (Chumbley & Friston, 2009)。使用 G*Power 软件计算多元回归分析结果的效应量(Faul et al., 2009)。

3 结果

3.1 行为数据结果

对新颖性问题提出比率和新颖有效性问题提出比率在性别上做独立样本 t 检验, 结果发现 2 个变量上均没有显著的性别差异($ps > 0.05$)。具体为，在新颖性问题提出比率上，男性被试的正确率为 0.86 ± 0.19，女性被试的正确率为 0.90 ± 0.10，男女之间没有显著差异(p = 0.184)；新颖有效性问题提出比率上，男性被试的正确率为 0.33 ± 0.27，女性被试的正确率为 0.33 ± 0.26，男女之间没有显著差异(p = 0.945)。然后对新颖性问题提出比率和新颖有效性问题提出比率做相关分析，结果发现两列数据相关极其显著 $r = 0.343, p < 0.001$。创造性科学问题提出比率的平均数和标准差等见表 1。

表 1 创造性科学问题提出比率的平均数和标准差

测量指标	平均数	CI95%	标准差	最小值	最大值	得分范围
新颖性问题	0.89	0.86 ~ 0.91	0.14	0.11	1.00	0.89
有效性问题	0.33	0.28 ~ 0.38	0.26	0.00	0.89	0.89

3.2 脑成像数据结果

3.2.1 ALFF 分析结果

分别对 ALFF 与新颖性问题提出比率、新颖有效性问题提出比率进行多元回归分析，将性别和年龄等作为协变量进行控制。结果显示：控制了协变量后，提出新颖有效性问题比率与左侧腹内侧前额叶(L-vmPFC)和右侧小脑前叶(Right cerebellum)的 ALFF 值呈显著正相关(表 2 和图 2)；没有发现和新颖性问题提出比率显著相关的脑区。

表 2 ALFF 和新颖有效性问题提出比率显著相关的脑区

脑区	半球	MNI			t 值	体素个数	效应量
		X	Y	Z	(最大点)	(Voxels)	f^2
ALFF 与新颖有效性问题提出比率显著							
正相关							
腹内侧前额叶	左	-6	12	-18	3.51	74	0.19
小脑前叶	右	9	-42	-30	4.53	124	0.25

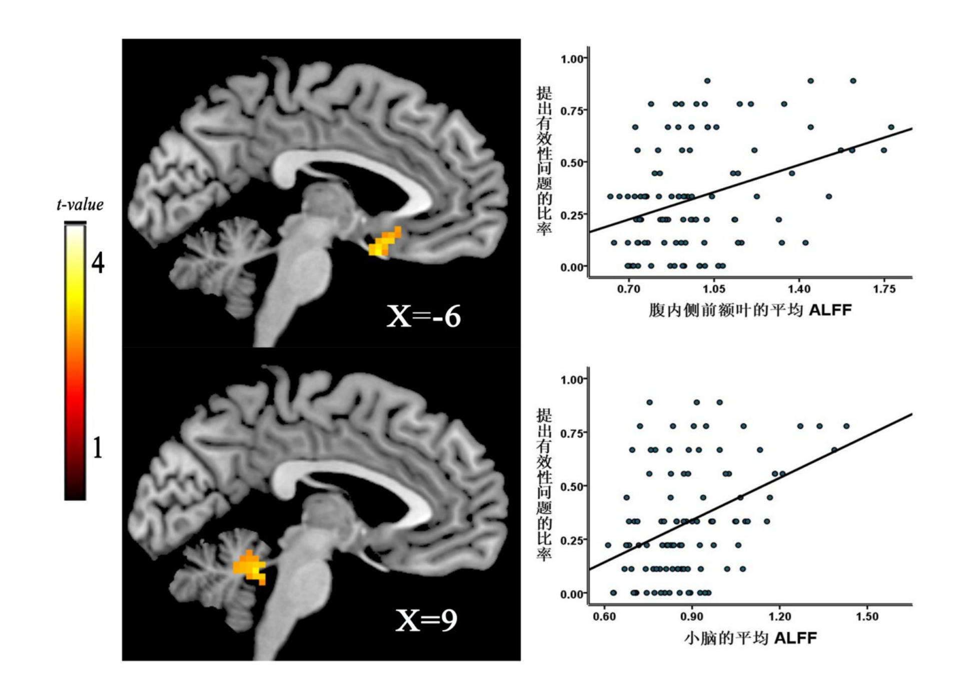


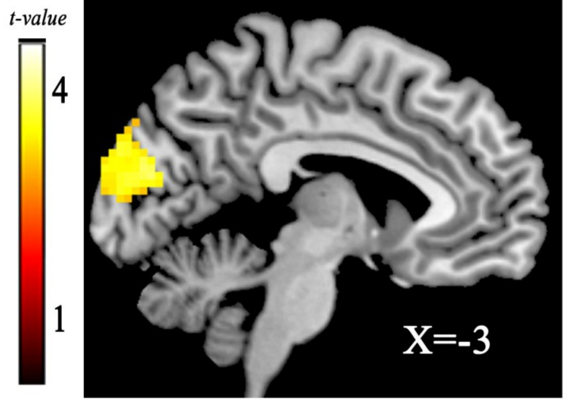
图 2 ALFF 值和新颖有效性问题提出比率显著相关的脑区。左图代表左侧腹内侧前额叶，右侧小脑的 ALFF 值与新颖有效性问题提出比率的显著相关。右图表示将与新颖有效性问题提出比率有显著相关的大脑区域的 ALFF 值提取出来, 并与新颖有效性问题提出比率进行 Pearson 相关分析。

3.2.2 RSFC 分析结果

分别选择 ALFF-行为分析显著的脑区(左侧 mPFC)和经典文献中与创造性思维密切相关的脑区(右侧 mPFC)作为种子点(Beaty et al., 2014)与全脑的功能连接进行多元回归分析。结果显示，控制了年龄，性别等协变量后，右内侧前额叶(R-mPFC)和左侧楔叶(L-Cuneus)之间的功能连接强度与提出新颖有效性问题的比率呈显著正相关(r=0.33, p<0.001)，内侧前额叶与楔叶之间的功能连接越强，提出新颖有效性问题的比率越高(表 3 和图 3); 左内侧前额叶(L-mPFC)和其他脑区的功能连接强度与提出有效性问题的比率之间不存在显著相关结果。

表 3 右侧内侧前额叶功能联接结果

脑区	半球	Peak MNI			t 值	体素个数	效应量
		X	Y	Z	(最大点)	(Voxels)	f^2
右侧内侧前额叶为种子点							
楔叶	左	-3	-90	33	4.03	249	0.13



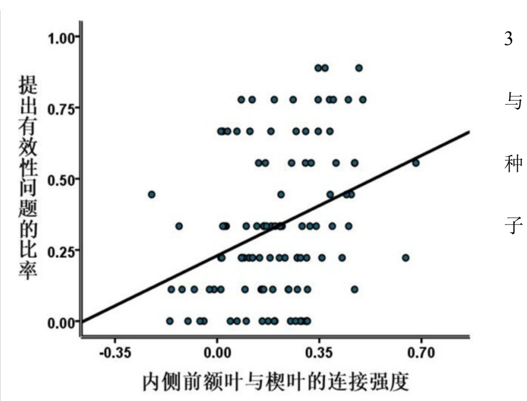


图 3 与种子

点组成的功能连接网络能够预测提出新颖有效性问题提出的脑区。左图表示以右内侧前额叶为种子点，与新颖有效性问题提出比率显著正相关的连接为左侧楔叶，右侧表示将与提出新颖有效性问题比率有显著相关的内侧额叶-楔叶功能连接值提取出来并与新颖有效性问题提出比率进行 Pearson 相关分析。

4 讨论

研究首次选取高生态学效度的科学发明问题情境作为实验材料，采用高空间分辨率的静息态功能磁共振成像技术，利用被广泛使用的 ALFF 和 RSFC 两种指标, 探索科学发明情境中问题提出的大脑功能基础, 为进一步理解创造性思维的本质提供了数据支持。结果发现，静息态自发神经活动强度和功能连接反映了科学发明情境中问题提出的个体差异。具体而言，在 ALFF 分析中，提出新颖有效性问题的比率越高，左内侧前额叶和右小脑前叶的自发活动越强。在进一步的 RSFC 分析中发现，提出新颖有效性问题比率与右内侧前额叶和左侧楔叶之间的功能连接强度呈显著正相关。两种静息态脑影像数据指标的分析结果说明了内侧前额叶在科学发明情境的问题提出过程中的重要作用。

创造性思维是产生新颖和适用观点或产品的过程，因此，无论是领域一般性的创造性思维(例如发散思维、聚合思维等)，还是领域特殊性的创造性思维(如科学创造力、艺术创造力等)都包含新颖观点的生成和评估(Sternberg & Lubart, 1993; Feist, 1998)。已有研究也发现二者都与负责新颖观点产生的内侧前额叶皮层和额中回的活动有关(Darsaud et al., 2011; Hao et al., 2013; Gilbert, Zamenopoulos, Alexiou, & Johnson, 2010; Fink et al., 2010; Limb & Braun, 2008)。因此，与已有结果相一致，当前研究中内侧前额叶自发活动与创造性科学问题提出比率的正相关可以理解其与新颖性观点的产生相关。

然而，科学创造力遵循更强的逻辑规则，更依赖于排除一切无关信息、有目的信息加工方式，更强调重新概括和综合已有的表面看似各不相干的知识, 创造出新的科学知识的能力(白学军, 巩彦斌, 胡卫平, 韩琴, 姚海娟, 2014; 胡卫平, 韩葵葵, 2015)。以往研究也发现高创造性问题提出个体更擅长抑制无关信息，更容易激活头脑中的概念网络联结等(胡卫平 等, 2015; 王博韬, 2013; 周寰, 2015)。Kounios 等人(2006)发现顿悟的心理准备与内侧额叶的显著激活有关,他们认为内侧额叶的激活可能与自上而下的认知控制的增长, 例如抑制无关思维, 选择合适的解决策略而忽视不合适的解决策略有关。Darsaud 等人采用数字递减任务探讨了延迟顿悟的神经机制，结果表明内侧前额叶可能参与了语义联结，规则发现等创造性相关的认知过程(Darsaud et al., 2011; Lang et al., 2006)。此外，还有一些研究推断内侧额叶参与到

冲突加工，反应选择和抑制控制等认知过程(Moore et al., 2009; Takeuchi et al., 2012)。因此，本研究推断，内侧前额叶可能帮助高问题提出个体更好的抑制无关信息，摆脱旧问题空间的束缚，对各语句的语义进行整合，将表面上相距较远的问题情境与启发性信息(原型或者个体本来的知识)建立语义联结，进而提出具有建设性的或者科学假设的问题。

此外，已有研究表明，高创造性科学问题提出个体能够更好的根据刺激在任务中的意义而在工作记忆中分别存储，从而提高信息加工的效率(周寰, 2015)。Howard-Jone 等人(2005)使用编造故事任务探讨创造性观点产生的神经机制，结果发现，相对于编造非创造性故事，编造创造性故事条件显著地激活了双侧的内侧前额叶，这可能反映了内侧前额叶与工作记忆的存储及情境性记忆的提取有关。此外，内侧前额叶也被认为在操作工作记忆中的信息中扮演重要作用(Cairo, Liddle, Woodward, & Ngan, 2004)。在本研究中，相比于对旧问题的简单重复，在头脑中寻找适当启发性原型、建立新异联系和形成新的具有科学假设的问题的加工过程增加了工作记忆负荷。因此，在新颖有效问题提出的过程中，内侧额叶可能还涉及信息在工作记忆中的存储和提取的过程。

此外，Beaty 等(2014)认为新颖观点的产生与默认网络(Default Mode Network，DMN)的经典脑区(如内侧前额叶、后扣带及双侧顶下小叶)有关。Takeuchi 等人(2012)探索创造性思维和内侧前额叶与大脑其他区域间的功能连接之间的关系。结果发现发散性思维测验分数与内侧前额叶-后扣带这两个默认网络的关键节点之间的功能连接强度显著正相关。Wei 等人(2014)进一步发现，托兰斯发散性思维测验分数与内侧前额叶-颞中回之间的功能连接强度显著正相关，而颞中回同样为默认网络节点。因此，内侧前额叶作为默认网络前部的核心节点，其功能连接强度的增强在创造性观点产生中发挥重要作用。此外，Takeuchi 等人(2010)采用弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)技术发现，内侧前额叶白质结构完整性与发散性思维测得的创造性思维显著正相关。结构连接是脑区间功能连接的基础(Greicius, Krasnow, Reiss, & Menon, 2003)，更高的个体白质结构完整性使更强的功能连接成为可能(Au Duong et al., 2005)。因此，高问题提出能力个体内侧前额叶功能连接的增强也许部分与高创造性个体有更高的内侧前额叶白质结构完整性有关。

科学活动的加工过程还包括信息从一个领域向另一个领域的迁移和转换，涉及大量的抽象推理(白学军 等, 2014; 胡卫平, 韩葵葵, 2015)。已有研究发现，相比于艺术创造力所激活的颞叶以及运动皮层，科学创造力更多地出现顶叶皮层的激活(Gilbert et al., 2010; Luo et al., 2013; O′Boyle et al., 2005; 沈汪兵 等, 2010)，而楔叶/楔前叶正是推理加工、问题解决任

务中常见的激活脑区(Ferstl & VoncrAmon, 2001; Luo et al., 2013; Qiu et al., 2010)。当前研究的 RSFC 分析中发现，提出新颖有效性问题比率与右内侧前额叶和左侧楔叶之间的功能连接强度呈显著正相关，与已有结果保持了较高的一致性，验证了本实验结果的可靠性。此外，Fink 等人(2014)发现言语想象创造性测试的灵活性和流畅性得分与右侧楔叶及楔前叶的灰质密度正相关。言语想象创造性测试的完成要求灵活观点的产生，多样变化的信息的利用以及问题导向的解决方案(而非无系统的不切实际的幻想)。据此，本研究推断在当前的创造性科学问题提出情境中，楔前叶所负责的推理加工、观点产生以及问题导向的思考方向使得新颖有效问题的提出成为可能。

Andreasen(2012)发现楔叶与词语联想任务的表现相关，结果可能反应了这些脑区与视觉意向(visual mental imagery)存在密切关联。沈汪兵 等人(2012)还发现楔叶和楔前叶组成的“非言语的”视觉空间信息加工网络有利于问题表征的有效转换。这些结果说明了顶枕区，如楔叶和楔前叶在心理表象中的突出作用。此外，先前研究表明，楔前叶与前额皮层一起控制着来源记忆(在来源记忆中记忆的来源情景被回想起), 这个过程中楔前叶的功能是为前额皮层提供充足的上下文的联系从而选择正确的过去的记忆(Lundstrom, Ingvar, & Petersson, 2005)，在科学创造力中这类情景记忆与个体的启发性知识的回忆有关(Luo et al., 2013; Qiu et al., 2010)。这些结果都证明了楔前叶通过在大脑中以实物形象再现的方式来进行信息提取和视觉表象的记忆检索。基于此，本研究推断高创造性问题提出个体可能拥有更生动的视觉心理表象和更好的情景记忆能力，使得启发性原型信息得到更好的贮存和提取，内侧额叶和楔叶的功能连接为这些认知能力的获得提供了大脑功能基础。

以往研究表明，高低创造性问题提出个体在注意资源分配上存在差异，具体表现为高创造性问题提出个体注意资源的分配和注意模式的转换更加灵活等(Feist, 1998; 王博韬, 2013; 周寰, 2015)。Qiu 等(2010)以字谜为实验材料探索顿悟问题准备和解决阶段的脑机制，结果发现成功解决问题状态显著激活了小脑。据此，研究者推断小脑也许在注意资源分配，知觉重组及信息提取中起到一定的作用。童丹丹等(2013)发现科学发明情境中的问题提出涉及的脑区也包含左侧内侧额叶、右小脑，其中，右小脑可能是配合内侧额叶进行注意资源的调节和分配。Houk 等(2005)则支持小脑负责维持个体正在进行的行为或者想法，为进行中的任务提供了矫正的功能。李文福(2014)进一步发现高学术成就组个体在小脑后叶上的灰质密度显著高于控制组，这样的结果可能反映了高成就组个体更好的语言整合和反应抑制能力。基于此，本研究推断当个体基于包含矛盾的问题情境提出问题时，高创造性问题提出个

体更好的利用小脑将提问目标维持在头脑中，并将更多的注意资源分配给情境中的矛盾或缺口, 对于这些矛盾进行更深的知觉重组，进而整合语言发现新颖且有效的科学问题。

本研究以高生态学效度的科学发明问题情境作为实验材料，采用静息态功能磁共振成像技术，基于低频振幅和静息态功能连接的分析方法，探讨创造性科学问题提出的脑机制。结果表明新颖有效性问题的提出是通过 mPFC 与其它脑区的协同联结来实现的，为进一步揭示科学创造力问题提出的神经机制提供了部分证据, 是首个利用静息态数据指标对科学发明问题提出进行系统分析的研究。当前研究也存在某些不足, 比如，研究中仅采用了静息态功能磁共振成像中较为基础的分析方法，缺乏其他模态的磁共振成像研究和更为复杂的脑网络分析。因此，在未来研究中可以加入弥散张量成像技术（Diffusion Tensor Imaging，DTI）、动态因果模型(dynamic causal modeling, DCM)以及小世界网络分析(small-world network)等技术帮助我们更加全面地探索创造性科学问题提出的神经机制；当前研究是以成年人为被试的横断研究，为了探明到大脑发育过程与创造性问题提出之间的关系，应该考虑以儿童和青少年群体为被试的纵向研究。因此，未来的研究还可以开展纵向的追踪研究，探讨创造性问题提出脑机制在不同时期的变化；另外，脑的活动与创造的环境是密不可分的，要充分描绘创造性问题提出的认知神经机制，未来研究还必须综合考虑创造过程中脑与多重环境系统之间的相互作用，进行多层次的研究。

参考文献

Abdulla, A. M., & Cramond, B. (2018). The creative problem finding hierarchy: A suggested model for understanding problem finding. *Creativity. Theories–Research-Applications, 5*(2), 197–229.

Abdulla, A. M., Paek, S. H., Cramond, B., & Runco, M. A. (2020). Problem finding and creativity: A meta-analytic review. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*. *14*(1):3-14

Andreasen, N. C. (2012). Creativity in art and science: are there two cultures? *Dialogues in Clinical Neuroscience, 14*(1), 49.

Au Duong, M. V., Boulanouar, K., Audoin, B., Treseras, S., Ibarrola, D., Malikova, I., . . . Cozzone, P. J. (2005). Modulation of effective connectivity inside the working memory network in patients at the earliest stage of multiple sclerosis. *Neuroimage, 24*(2), 533–538.

Aziz-Zadeh, L., Kaplan, J. T., & Iacoboni, M. (2009). “Aha!”: The neural correlates of verbal insight solutions. *Human Brain Mapping, 30*(3), 908–916.

Bai, X. J., Gong, Y. B., Hu, W. P., Han, Q., & Yao, H. J. (2014). The inhibitory mechanism of individuals with different scientific creativity. *Studies of Psychology and Behavior, 12*(2), 151–155.

[白学军, 巩彦斌, 胡卫平, 韩琴, 姚海娟. (2014). 不同科学创造力个体干扰抑制机制的比较. *心理与行为研究, 12*(2), 151–155.]

Beaty, R. E., Benedek, M., Wilkins, R. W., Jauk, E., Fink, A., Silvia, P. J., . . . Neubauer, A. C. (2014). Creativity and the default network: A functional connectivity analysis of the creative brain at rest. *Neuropsychologia, 64C*(2), 92.

Biswal, B., Yetkin, F. Z., Haughton, V. M., & Hyde, J. S. (2010). Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar mri. *Magnetic Resonance in Medicine, 34*(4), 537–541.

Buckner, R. L. (2012). The serendipitous discovery of the brain's default network. *Neuroimage, 62*(2), 1137–1145.

Cairo, T. A., Liddle, P. F., Woodward, T. S., & Ngan, E. T. (2004). The influence of working memory load on phase specific patterns of cortical activity. *Brain Research Cognitive Brain Research, 21*(3), 377.

Chen, B., Hu, W., & Plucker, J. A. (2016). The effect of mood on problem finding in scientific creativity. *The Journal of Creative Behavior, 50*(4), 308–320.

Chen, Q. L., Yang, W. J., Li, W. F., Wei, D. T., Li, H. J, Lei, Q., . . . Qiu, J. (2014). Association of creative achievement with cognitive flexibility by a combined voxel-based morphometry and resting-state functional connectivity study. *Neuroimage, 102*, 474–483.

Cheng, L. F., Hu, W. P., Jia, X. J., & Runco, M. A. (2016). The different role of cognitive inhibition in early versus late creative problem finding. *Psychology of Aesthetics Creativity & the Arts, 10*(1), 32–41.

Chen, L. J., Zhang, Q. L. & Cai. Z., (2006). The effect of the stimuli-presenting mode on children's problem-finding in different fields. *Psychological Science*, (02), 43–46.

[陈丽君, 张庆林, 蔡治. (2006). 材料呈现方式对儿童不同领域问题发现的影响. *心理科学*, (02), 43–46.]

Chen, L. J., & Zheng, X. (2011). The exploratory study of cognitive stages in problem-finding process. *Psychological exploration*, *31*(4), 332–337.

[陈丽君, 郑雪. (2011). 问题发现过程认知阶段划分的探索性研究. *心理学探新, 31*(4), 332–337.]

Chumbley, J. R., & Friston, K. J. (2009). False discovery rate revisited: FDR and topological inference using Gaussian random fields. *Neuroimage, 44*(1), 62–70.

Dandan, T., Wenfu, L., Tianen, D., Nusbaum, H. C., Jiang, Q., & Qinglin, Z. (2013). Brain mechanisms of valuable scientific problem finding inspired by heuristic knowledge. *Experimental Brain Research, 228*(4), 437–443.

Darsaud, A., Wagner, U., Balteau, E., Desseilles, M., Sterpenich, V., Vandewalle, G., . . . Boly, M. (2011). Neural precursors of delayed insight. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*(8), 1900–1910.

Dietrich, A., & Kanso, R. (2010). A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psychological Bulletin*, 136(5), 822.

Fan, Y. L., Fan, X. F., Luo, W. C., Wu, G. H., Yan, X., Yin, D. Z., … Xu, D. R. (2014). An explorative fMRI study of human creative thinking using a specially designed iCAD system. *Acta Psychologica Sinica*, *46*(4), 427–436.

[范亮艳, 范晓芳, 罗位超, 吴功航, 严序, 尹大志, … 徐冬溶. (2014). 艺术设计中创造性思维的 fMRI 研究: 一项基于智能 CAD 的探索. 心理学报, *46*(4), 427–436.]

Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A. G. (2009). Statistical power analyses using g*power 3.1: tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, *41*(4), 1149–1160.

Feist, G. J. (1998). A meta-analysis of personality in scientific and artistic creativity. *Personality and Social Psychology Review*, *2*(4), 290–309.

Ferstl, E. C., & VoncrAmon, D. Y. (2001). The role of coherence and cohesion in text comprehension: An event-related fMRI study. *Cognitive Brain Research, 11*, 325−340.

Fink, A., Grabner, R. H., Gebauer, D., Reishofer, G., Koschutnig, K., & Ebner, F. (2010). Enhancing creativity by means of cognitive stimulation: evidence from an fmri study. *NeuroImage, 52*(4), 1687–1695.

Fink, A., Koschutnig, K., Hutterer, L., Steiner, E., Benedek, M., Weber, B., . . . Weiss, E. M. (2014). Gray matter density in relation to different facets of verbal creativity. *Brain Structure and Function, 219*(4), 1263–1269.

Fulwiler, C. E., King, J. A., & Zhang, N. (2012). Amygdala–orbitofrontal resting-state functional connectivity is associated with trait anger. *Neuroreport, 23*(10), 606–610.

Gansler, D. A., Moore, D. W., Susmaras, T. M., Jerram, M. W., Sousa, J., & Heilman, K. M. (2011). Cortical morphology of visual creativity. *Neuropsychologia, 49*(9), 2527–2532.

Getzels, J. W. (2011). Problem-finding and the inventiveness of solutions. *Journal of Creative Behavior, 9*(1), 12–18.

Gilbert, S. J., Zamenopoulos, T., Alexiou, K., & Johnson, J. F. (2010). Involvement of right dorsolateral prefrontal cortex in ill-structured

design cognition: An fMRI study. *Brain Research*, *1312*(2), 79–88.

Gilhooly, K. J., Fioratou, E., & Henretty, N. (2011). Verbalization and problem solving: Insight and spatial factors. *British Journal of Psychology, 101*(1), 81–93.

Greicius, M. D., Krasnow, B., Reiss, A. L., & Menon, V. (2003). Functional connectivity in the resting brain: A network analysis of the default mode hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 100*(1), 253–258.

Hahn, A., Stein, P., Windischberger, C., Weissenbacher, A., Spindelegger, C., Moser, E., . . . Lanzenberger, R. (2011). Reduced resting-state functional connectivity between amygdala and orbitofrontal cortex in social anxiety disorder. *Neuroimage, 56*(3), 881–889.

Han, Q., Hu, W., Liu, J., Jia, X., & Adey, P. (2013). The influence of peer interaction on students creative problem-finding ability. *Creativity Research Journal, 25*(3), 248–258.

Hao, X., Cui, S., Li, W. F., Yang, W. J., Qiu, J., & Zhang, Q. L. (2013). Enhancing insight in scientific problem solving by highlighting the functional features of prototypes: An fMRI study. *Brain Research, 1534*:46–54.

He, Y., Wang, L., Zang, Y., Tian, L., & Jiang, T. (2007). Regional coherence changes in the early stages of Alzheimer's disease: A combined structural and resting-state functional MRI study. *Neuroimage, 35*(2), 488–500.

Hennessey, B. A., & Amabile, T. M. (2010). Creativity. *Social Science Electronic Publishing, 61*(1), 569–598.

Holman, D. M. (2018). *What am I supposed to do? Problem Finding and its impact on Problem Solving.* UC Merced.

Houk, J. C. (2005). Agents of the mind. *Biological Cybernetics, 92*(6), 427–437.

Howard-Jones, P. A., Blakemore, S. J., Samuel, E. A., Summers, I. R., & Claxton, G. (2005). Semantic divergence and creative story generation: An fMRI investigation. *Brain Res Cogn Brain Res, 25*(1), 240–250.

Hu, W. P., & Adey, P. (2002). A scientific creativity test for secondary school students. *International Journal of Science Education*, *24*(4), 389–403.

Hu, W. P., Cheng, L. F., Jia, X. J., Han, M., & Chen., Y. H. (2015). The influence of Cognitive inhibition to Creative Scientific Problem Finding: Mediating effect of field cognitive style. *Studies of Psychology and Behavior, 13*(6), 721–728.

[胡卫平, 程丽芳, 贾小娟, 韩蒙, 陈英和. (2015). 认知抑制对创造性科学问题提出的影响:认知风格的中介作用. *心理与行为研究, 13*(6), 721–728.]

Hu, W. P., & Han, K. K. (2015). Theoretical research and practical exploration of adolescents'scientific creativity. *Psychological Development and Education. 31*(1), 44–50.

[胡卫平, 韩葵葵. (2015). 青少年科学创造力的理论研究与实践探索. *心理发展与教育, 31*(1), 44–50.]

Hu, W. P., & Zhou, P. (2010). The influences of motivation on creative scientific problem finding ability of first year students in high School. *Psychological Development and Education.* (01), 34–39.

[胡卫平, 周蓓. (2010). 动机对高一学生创造性的科学问题提出能力的影响. *心理发展与教育*, (01), 34–39.]

Hu, W., Shi, Q. Z., Han, Q., Wang, X., & Adey, P. (2010). Creative scientific problem finding and its developmental trend. *Creativity research journal, 22*(1), 46–52.

Huang, F., Fan, J., & Luo, J. (2015). The neural basis of novelty and appropriateness in processing of creative chunk decomposition. *Neuroimage, 113*, 122–132.

Jia, X. J., Hu, W. P., Cai, F. C., Wang, H. H., Li, J., & Runco, M. A., et al. (2017). The influence of teaching methods on creative problem finding. *Thinking Skills and Creativity, 24*, 86–94.

Jung-Beeman, M., Bowden, E. M., Haberman, J., Frymiare, J. L., Arambel-Liu, S., Greenblatt, R., . . . Kounios, J. (2004). Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS biology, 2*(4), e97.

Jung, R. E., Mead, B. S., Carrasco, J., & Flores, R. A. (2013). The structure of creative cognition in the human brain. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*(2), 330.

Jung, R. E., Segall, J. M., Bockholt, J. H., Flores, R. A., Smith, S. M., Chavez, R. S., et al. (2010). Neuroanatomy of creativity. *Human Brain Mapping. 31*, 398–409.

Kaplan, C. A., & Simon, H. A. (1990). In search of insight. *Cognitive psychology, 22*(3), 374–419.

Kounios, J., & Beeman, M. (2013). The cognitive neuroscience of insight. *Annual Review of Psychology, 65*(1), 71–93.

Kounios, J., Frymiare, J. L., Bowden, E. M., Fleck, J. I., Subramaniam, K., Parrish, T. B., & Jung-Beeman, M. (2006). The prepared mind neural activity prior to problem presentation predicts subsequent solution by sudden insight. *Psychological Science, 17*(10), 882–890.

Lang, S., Kanngieser, N., Jaśkowski, P., Haider, H., Rose, M., & Verleger, R. (2006). Precursors of insight in event-related brain potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience, 18*(12), 2152.

Lee, H., & Cho, Y. (2007). Factors affecting problem finding depending on degree of structure of problem situation. *Journal of Educational Research, 101*(2), 113–124.

Li, H. Y., Hu, W. P., & Shen, J. L. (2010). School environment effects on the relations between adolescents' personality and creative scientific problem finding. *Psychological Science*, (05), 132–136.

[李海燕, 胡卫平, 申继亮. (2010). 学校环境对初中生人格特征与创造性科学问题提出能力关系的影响. *心理科学*. (05), 132–136.]

Li, W. F. (2014). *The neural basis of creativity via multi-modal brain imaging investigation*. Unpublished doctor's thesis, Southwest university.

[李文福. (2014). *创造性的脑机制——来自多模态磁共振成像的探索*. 博士学位论文, 西南大学.]

Li, W. F., Tong, D. D., Qiu, J., & Zhang, Q. L. (2016). The neural basis of scientific innovation problems solving. *Acta Psychologica Sinica*, *48*(4), 331–342.

[李文福, 童丹丹, 邱江, 张庆林. (2016). 科学发明问题解决的脑机制再探. *心理学报, 48*(4), 331–342.]

Limb, C. J., & Braun, A. R. (2008) Neural substrates of spontaneous musical performance: An fMRI Study of Jazz improvisation. *PLoS ONE, 3*(2), e1679.

Lundstrom, B. N., Ingvar, M., & Petersson, K. M. (2005). The role of precuneus and left inferior frontal cortex during source memory episodic retrieval. *Neuroimage, 27*(4), 824–834.

Luo, J., & Niki, K. (2003). Function of hippocampus in "insight" of problem solving. *Hippocampus, 13*(3), 316–323.

Luo, J., & Zhang, X. L. (2006). From the impasse to the breakthrough: the brain basis for insightful problem solving. *Advances of Psychological Science, 14*(4):484–489.

[罗劲, 张秀玲. (2006). 从困境到超越:顿悟的脑机制研究.*心理科学进展,14*(4):484–489.]

Luo, J. L., Li, W. F., Qiu, J., Wei, D. T., Liu, Y. J., & Zhang, Q. L. (2013). Neural basis of scientific innovation induced by heuristic prototype. *PLoS ONE, 8*(1), e49231

Luo, Y. M., Li, B. L., Liu, J., Bi, C. Z., & Huang, X. T. (2015). Amplitude of low-frequency fluctuations in happiness: A resting-state fMRI study. *Chinese Science Bulletin*, *60*(2), 170–178.

[罗扬眉, 李宝林, 刘杰, 毕重增, 黄希庭. (2015). 幸福感的静息态功能磁共振成像低频振幅. *科学通报, 60*(2), 170–178.]

Mennes, M., Kelly, C., Zuo, X. N., Martino, A. D., Biswal, B. B., Castellanos, F. X., & Milham, M. P. (2010). Inter-individual differences in resting-state functional connectivity predict task-induced BOLD activity. *Neuroimage, 50*(4), 1690–1701.

Moore, D. W., Bhadelia, R. A., Billings, R. L., Fulwiler, C., Heilman, K. M., Rood, K. M. J., & Gansler, D. A. (2009). Hemispheric connectivity and the visual–spatial divergent-thinking component of creativity. *Brain & Cognition, 70*(3), 267–272.

O′Boyle, M. W., Cunnington, R., Silk, T. J., Vaughan, D., Jackson, G., & Syngeniotis, A., et al. (2005). Mathematically gifted male adolescents activate a unique brain network during mental rotation. *Cognitive Brain Research, 25*(2), 583–587.

Okuda, S. M., Runco, M. A., & Berger, D. E. (1991). Creativity and the finding and solving of real-world problems. *Journal of Psychoeducational Assessment, 9*(1), 45–53.

Paletz, S. B. F., & Peng, K. (2009). Problem finding and contradiction: examining the relationship between naive dialectical thinking, ethnicity, and creativity. *Creativity Research Journal, 21*(2–3), 139–151.

Qian, Z. H.(1999). A brief discussion of scientific problems. *Journal of jiangsu university (social science edition)*,(2), 9–12.

[钱兆华. (1999). 简论科学问题. *江苏理工大学学报(社会科学版)*, (2), 9–12]

Qiu, J., Li, H., Jou, J., Liu, J., Luo, Y., Feng, T., . . . Zhang, Q. (2010). Neural correlates of the "Aha" experiences: Evidence from an fMRI study of insight problem solving. *Cortex, 46*(3), 397–403.

Ravizza, S. M., Mccormick, C. A., Schlerf, J. E., Justus, T., Ivry, R. B., & Fiez, J. A. (2006). Cerebellar damage produces selective deficits in verbal working memory. *Brain, 129*(2), 306–320.

Reiter-Palmon, R., & Robinson, E. J. (2009). Problem identification and construction: What do we know, what is the future? *Psychology of Aesthetics Creativity & the Arts, 3*(1), 43–47.

Runco, M. A., Illies, J. J., & Reiterpalmon, R. (2005). Explicit instructions to be creative and original: A comparison of strategies and criteria as targets with three types of divergent thinking tests. *Korean Journal of Thinking & Problem Solving, 15*(1), 5–15.

Runco, M. A., & Okuda, S. M. (1988). Problem discovery, divergent thinking, and the creative process. *Journal of Youth and Adolescence, 17*(3), 211–220.

Shamay-Tsoory, S. G., Adler, N., Aharon-Peretz, J., Perry, D., & Mayseless, N. (2011). The origins of originality: the neural bases of creative thinking and originality. *Neuropsychologia, 49*(2), 178–185.

Shen, J. L., Hu, W. P., & Lin, C. D. (2002). Constructing of the scientific creativity test for adolescent. *Psychological Development and Education*, *16*(4), 76–81.

[申继亮, 胡卫平, 林崇德. (2002). 青少年科学创造力测验的编制. *心理发展与教育, 16*(4), 76–81.]

Shen, W. B., Liu, C., & Wang, Y. J. (2010). Neurophysiological basis of artistic creativity. *Advances in Psychological Science*, *18*(10), 520–1528.

[沈汪兵, 刘昌, 王永娟. (2010). 艺术创造力的脑神经生理基础. *心理科学进展, 18*(10), 520–1528.]

Shen, W. B., Luo, J., Liu, C., & Yuan, Y. (2012). One decade for insightful brain: New advances on neural correlates of insight (in Chinese). *Chinese Science Bulletin, 57*(21), 1948–1963.

[沈汪兵, 罗劲, 刘昌, 袁媛. (2012). 顿悟脑的 10 年:人类顿悟脑机制研究进展. *科学通报, 57*(21), 1948–1963.]

Song, X. W., Dong, Z. Y., Long, X. Y., Li, S. F., Zuo, X. N., Zhu, C. Z., . . . Harrison, B. J. (2011). REST: A toolkit for resting-state functional magnetic resonance imaging data processing. *Plos One, 6*(9), e25031.

Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1993). Investing in Creativity. *Psychological Inquiry, 4*(3), 229–232.

Subramaniam, K. (2008). The behavioral and neural basis for the facilitation of insight problem-solving by a positive mood. Northwestern University.

Takeuchi, H., Taki, Y., Hashizume, H., Sassa, Y., Nagase, T., Nouchi, R., & Kawashima, R. (2012). The association between resting functional connectivity and creativity. *Cerebral Cortex, 22*(12), 2921–2929.

Takeuchi, H., Taki, Y., Sassa, Y., Hashizume, H., Sekiguchi, A., Ai, F., & Kawashima, R. (2010). White matter structures associated with creativity: Evidence from diffusion tensor imaging. *Neuroimage, 51*(1), 11.

Talati, A., & Hirsch, J. (2005). Functional specialization within the medial frontal gyrus for perceptual go/no-go decisions based on “what,” “when,” and “where” related information: An fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience, 17*(7),981–993.

Tong, D. D. (2017). *The study of cognitive neural mechanisms of creative scientific problems.* Unpublished doctor’s thesis, Southwest university.

[童丹丹. (2017). *创造性科学问题提出的认知神经机制.* 博士学位论文, 西南大学.]

Tong, D. D., Dai, T. E., Li, W. F., Qiu, J., & Zhang, Q. L. (2013). An fMRI study for problem-finding in scientific inventional situation. *Acta Psychologica Sinica*, *45*(7), 740–751.

[童丹丹, 代天恩, 李文福, 邱江, 张庆林. (2013). 科学发明情境中问题提出的 fMRI 研究. *心理学报, 45*(7), 740–751.]

Tong, D. D., Li, W. F., Dai, T. E., Nusbaum, H. C., Qiu, J., & Zhang, Q. L. (2013). Brain mechanisms of valuable scientific problem finding inspired by heuristic knowledge. *Experimental Brain Research*. *228*:437–443.

Torrance, E.P. (1966). The torrance tests of creative thinking-norms-technical manual research edition-verbal tests, Forms A and B-Figural Tests, Forms A and B. Princeton,NJ: Personnel Press.

Wang, B. T. (2013). *Effects of hemispheric interaction on creative scientific problem finding ability.* Unpublished master’s thesis, Shanxi normal university.

[王博韬. (2013). *大脑半球互动水平对创造性科学问题提出能力的影响.* 硕士学位论文, 山西师范大学.]

Wang, B. T., Duan, H. J., Han, Q., & Hu, W. P. (2017). The influence of inter-hemispheric interaction on creative scientific problem

finding ability. *Studies of Psychology and Behavior, 15*(2), 92–102.

[王博韬, 段海军, 韩琴, 胡卫平. (2017). 大脑半球互动对创造性科学问题提出能力的影响. *心理与行为研究*, *15*(2), 92–102.]

Wang, Z., Yan, C., Zhao, C., Qi, Z., Zhou, W., Lu, J., . . . Li, K. (2011). Spatial patterns of intrinsic brain activity in mild cognitive impairment and alzheimer's disease: A resting-state functional MRI study. *Human Brain Mapping, 32*(10), 1720–1740.

Ward, T. B. (2007). Creative cognition as a window on creativity. *Methods, 42*(1), 28.

Wei, D. T., Yang, J. Y., Li, W. F., Wang, K. C., Zhang, Q. L., & Qiu, J. (2014). Increased resting functional connectivity of the medial prefrontal cortex in creativity by means of cognitive stimulation. *Cortex, 51*(1), 92–102.

Wei, L., Duan, X., Zheng, C., Wang, S., & Chen, H. (2013). Specific frequency bands of amplitude low-frequency oscillation encodes personality. *Human Brain Mapping, 35*(1), 331–339.

Whitfield-Gabrieli, S., & Nieto-Castanon, A. (2012). A functional connectivity toolbox for correlated and anticorrelated brain networks. *Brain Connect, 2*(3), 125–141.

Wu, L., Knoblich, G., & Luo, J. (2013). The role of chunk tightness and chunk familiarity in problem solving: Evidence from ERPs and FMRI. *Human Brain Mapping, 34*(5), 1173–1186.

Wu, Z. Z., Qiu, J., & Zhang, Q. L. (2008). Exploring the mechanism for prototype elicitation effect in insight. *Psychological Development and Education. 24*(1), 31–35.

[吴真真, 邱江, 张庆林. (2008). 顿悟的原型启发效应机制探索. *心理发展与教育, 24*(1), 31–35.]

Wu, Z. Z., & Zhang, Q. L. (2005). Effects of familiarity of fields and questioning-constrained on the creativity of question-asking of undergraduates. *Chinese Journal of Clinical Rehabilitation*. (44), 61–63.

[吴真真, 张庆林. (2005). 领域熟悉度和提问限制对大学生提问创造性的影响. *中国临床康复*, (44), 61–63.]

Xue, H., Lu, K., & Hao, N. (2018). Cooperation makes two less-creative individuals turn into a highly-creative pair. *Neuroimage, 172*, 527–537.

Yan, C. G., & Zang, Y. F. (2010). DPARSF: a MATLAB toolbox for "pipeline" data analysis of resting-state fMRI. *Frontiers in systems neuroscience, 4*. 13.

Yang, W. J., Jin, Y. L., Qiu, J., & Zhang, Q. L. (2018). The effect of prototype difficulty and semantic similarity on the prototype activation. *Acta Psychologica Sinica*, *50*(3), 260–269..

[杨文静, 靳玉乐, 邱江, 张庆林. (2018). 问题先导下语义相似性和原型难度对原型启发的影响. *心理学报, 50*(3), 260–269.]

Zang, Y. F., He, Y., Zhu, C. Z., Cao, Q. J., Sui, M. Q., Liang, M., . . . Wang, Y. F. (2007). Altered baseline brain activity in children with ADHD revealed by resting-state functional MRI. *Brain & Development, 29*(2), 83–91.

Zeng, L. L., Shen, H., Liu, L., Wang, L., Li, B., Fang, P., . . . Hu, D. (2012). Identifying major depression using whole-brain functional connectivity: a multivariate pattern analysis. *Brain A Journal of Neurology, 135*(Pt 5), 1498.

Zhao, Q., Zhou, Z., Xu, H., Chen, S., Xu, F., Fan, W., & Han, L. (2013). Dynamic neural network of insight: A functional magnetic resonance imaging study on solving chinese riddles. *Plos One, 8*(3), e59351.

Zhu, D., Luo, J. L., Zhu, H. X., Qiu, J., & Zhang, Q. L. (2011). The effect of prototype inspiration in the process of Scientific innovation thinking. *Journal of Southwest University (Social Sciences Edition), 37*(5), 144–149.

[朱丹, 罗俊龙, 朱海雪, 邱江, 张庆林. (2011). 科学发明创造思维过程中的原型启发效应. *西南大学学报 (社会科学版), 37*(5), 144–149.]

Zhou, D. & Shi, J. N. (2005). Creative process: From the information processing perspective. *Advances in Psychological Science*. 13(6), 721–727.

[周丹, 施建农. (2005). 从信息加工的角度看创造力过程. *心理科学进展, 13*(6), 721–727.]

Zhou, H. (2015). *Research on the difference of novelty evaluation process of college students with different creative science problem finding ability.* Unpublished master's thesis, Shaanxi Normal University.

[周寰. (2015). *不同创造性科学问题提出能力大学生新颖性评价过程的差异研究.* 硕士学位论文, 陕西师范大学.]

Zou, Q., Ross, T. J., Gu, H., Geng, X., Zuo, X. N., Hong, L. E., . . . Yang, Y. (2013). Intrinsic resting-state activity predicts working memory brain activation and behavioral performance. *Human Brain Mapping, 34*(12), 3204-3215.

Zhang, Q. L., Tian, Y., Qiu, J. (2012). Automatic activation of prototype representation in insight: The sources of inspiration. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 34*(9), 144–149.

[张庆林, 田燕, 邱江. (2012). 顿悟中原型激活的大脑自动响应机制: 灵感机制初探. *西南大学学报(自然科学版), 34*(9), 1–10.]

Zuo, X. N., Martino, A. D., Kelly, C., Shehzad, Z. E., Gee, D. G., Klein, D. F., . . . Milham, M. P. (2010). The oscillating brain: Complex and reliable. *Neuroimage, 49*(2), 1432–1445.

The neural basis of scientific innovation problem finding

TONG DanDan[1,2]; LI WenFu[3]; LU Peng[1]; YANG WenJing[2]; YANG Dong[2]; ZHANG QingLin[2]; QIU Jiang[2]

1 School of Psychology, Northwest Normal University, Key Laboratory of Behavioral and Mental Health of Gansu Province, Lanzhou 730070, China

2 School of Psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China

3 Department of Mental Health, Jining Medical University, Jining 272067, *China*

Abstract

Creative thinking, which refers to the process by which individuals produce a unique, valuable product based on existing knowledge, experience, and multi-perspective thinking activities, is the cornerstone of human civilization and social progress. As an important part of the creative field, scientific inventions in particular require individuals to break the existing state and build new things in the process of creating them. Therefore, the use of real-life examples of scientific inventions to explore the cognitive neural mechanism of creative thinking has become a focus of recent research. There have been many studies of creative problem solving, especially regarding its neural mechanisms. However, less attention has been paid to the issue of problem finding. Hence, the present study employed resting-state functional magnetic resonance imaging (rs-fMRI) and scientific invention problem-finding materials to identify the neural substrates of the process of scientific innovation problem finding.

In the present study, nine scientific innovation problem situations were selected as materials. Each problem consisted of three parts: (paradoxical) problem situation, (misleading) old problem, and heuristic prototype. The modified learning-testing paradigm was used to explore the brain mechanisms of problem finding. Participants were asked to find a new problem based on the given problem situation and old problem in the testing phase after learning all the heuristic prototypes in the learning phase. A total of 104 undergraduates (mean age = 19.26±0.99) were enrolled in the final experiment. The rs-fMRI data were acquired using an echo planar imaging (EPI) sequence from a 3-T Siemens Magnetom Trio scanner (Siemens Medical, Erlangen, Germany) at the MRI center of Southwest University. We used both the amplitude of low-frequency fluctuation (ALFF) and resting-state functional connectivity (RSFC) to measure the local properties of rs-fMRI signals, and then investigated the relationship between ALFF/RSFC and individual differences in scientific problem finding.

After controlling for age and sex, the results of multiple regression analysis showed that individuals with a high rate of useful problems had higher spontaneous brain activity in the left medial prefrontal cortex (L-mPFC) and cerebellum. Functional connectivity analysis further found a significant positive correlation between the rate of useful problems and the mPFC-Cuneus functional connectivity.

Based on these results, we infer that: (1) the mPFC plays an important role in the process of scientific innovation problem finding. It might be responsive to two aspects: one involved in breaking the thinking set and forming novel association and another associated with the extraction and processing of working memory. (2) The cerebellum and the cuneus might be separately involved in the inter-semantic allocation of attentional resources and divulging.
Key words creativity, scientific innovation problem finding, mPFC, AlFF, RSFC